

Refuges à poissons aménagés dans les berges de rivières soumises aux éclusées

Jean-Marc Ribí, Jean-Louis Boillat, Armin Peter, Anton Schleiss

Résumé

Dans la perspective d'atténuer les impacts des éclusées hydroélectriques, un refuge latéral a été étudié comme mesure de protection des poissons. Suivant une procédure expérimentale, des truites fario juvéniles ont été soumises à des vitesses épuisantes dans un canal expérimental alimenté en eau de rivière. Ce canal long de 12 m, comporte un élargissement rectangulaire local dans lequel une circulation d'eau est forcée par l'installation d'un épi de dérivation. Grâce à cet artifice, la majeure partie des poissons impliqués dans les essais se dirige vers le refuge. En optimisant la position et l'orientation de cet épi, le taux de présence moyen a atteint 87%. Recherchant à déceler les conditions hydrauliques qui attirent les poissons, des champs de vitesses 2D ont été simulés dans le plan horizontal et des profils de vitesses verticaux ont été mesurés par ultrasons. Cette documentation a permis de reconnaître les vitesses recherchées par les poissons pour rejoindre le refuge. Sur cette base la configuration la plus prometteuse a été identifiée, et des recommandations sont proposées pour la réalisation de prototypes de refuges en rivière.

Zusammenfassung

Um die Auswirkungen von Schwall und Sunk in Flüssen unterhalb Speicherkraftwerken zu vermindern, wurde die Wirkung von an Ufern angeordneten Buchten untersucht, welche als Fischrefugien dienen können. Die experimentelle Studie wurde in einem Versuchskanal mit Flusswasser und Forellenjährlingen durchgeführt, indem letztere Fliessbedingungen ausgesetzt wurden wie sie bei Schwall und Sunk vorkommen. In einem Kanal von 12 m Länge wurde seitlich eine rechteckförmige Bucht als Fischrefugium angeordnet. Eine Umlenkbohle bewirkte dass eine bestimmte Abflussmenge vom Kanal in diese Bucht umgelenkt wurde. Dank dieser in die Bucht eintretende Abflussmenge, wurden die meisten Fische von diesem Refugium während Schwall und Sunk angezogen. Mit einer optimalen Ausgestaltung dieser Umlenkbohle resp. -insel konnte ein mittlere Aufenthaltszeit der Fische im Refugium von 87% erreicht werden. Um die hydraulischen Bedingungen besser zu verstehen, welche für die Lockströmung in die Bucht verantwortlich sind, wurden 2D-Strömungsberechnungen durchgeführt sowie die horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitsverteilungen im Versuchskanal mit Ultraschallsonden gemessen. Die beobachteten Fliesswege der Fische in die seitliche Bucht geben einen klaren Hinweis über die Geschwindigkeitsverteilung, welche erforderlich ist, so dass die meisten Fische das Refugium schnell finden. Aufgrund der erfolgversprechendsten Anordnung von Bucht und Umlenkbohle können erste Empfehlungen für die Umsetzung von Uferbuchten als Rückzugmöglichkeit für Fische während Schwall und Sunk in Fliessgewässern abgegeben werden.

1. Problématique des éclusées

La problématique des éclusées est associée à la production d'électricité à partir des centrales hydrauliques à accumulation. Par vocation, la production d'électricité répond à la demande des consommateurs dont elle suit les variations au cours du temps. Les aménagements hydroélectriques constitués d'un ou plusieurs réservoirs, sont particulièrement bien adaptés pour

produire l'énergie électrique nécessaire pour couvrir les pointes journalières. En Suisse, la production des centrales à accumulation représente plus du tiers de la consommation totale. Selon les prévisions, il est encore possible, d'augmenter la production de ces aménagements de 6% en moyenne annuelle, et de 20% en hiver (Schleiss, 2007). Les rivières alpines et préalpines d'importance sont directement

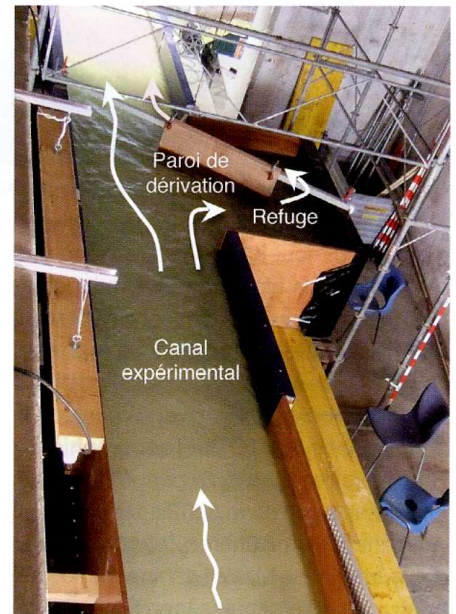


Figure 1. Canal expérimental de la Maigrage, Fribourg (Suisse).

concernées.

L'un des corollaires de ce mode d'exploitation dit «par éclusées», est une modification du régime hydrologique des cours d'eau concernés (Meile & al. 2011). Sans précautions particulières, le régime naturel est affecté la plupart du temps, par une alternance cadencée et monotone des débits, en aval des points de restitution. Il est alors question de débits maximaux valant de 10 à 40 fois les débits de base. Ces derniers correspondent en général aux débits naturels et dans certains cas aux débits de dotation. Depuis plus de 3 décennies, les impacts négatifs de ce régime artificiel d'éclusées sont étudiés. Le rapport final du projet «Réseau suisse poissons en diminution» (Fischnetz, 2004) relève une diminution de 60% de la prise de truites dans les rivières suisses depuis 1980. La pauvreté en refuges naturels dans les rivières chenalées, combinée avec le stress induit par les éclusées figurent parmi les causes du déclin piscicole observé. En relation avec les éclusées, Peter & Schager (Fischnetz, 2004) soulignent l'importance de la morphologie et du degré d'aménagement sur l'impact

écologique des éclusées. Ils préconisent l'amélioration prioritaire de la qualité des habitats dans les tronçons influencés. Le rapport de synthèse «Schwall/Sunk» du projet Rhône-Thur (2005), mentionne pour les régions alpines, les variations de la température de l'eau et de sa turbidité comme effets nuisibles des éclusées, en plus du colmatage des lits et des crues artificielles hivernales qui affectent les frayères. A propos des conséquences écologiques des éclusées, la revue bibliographique de l'OFEV (2003) donne un état de l'art. Elle propose un cadre méthodologique pour l'évaluation des impacts et des recommandations pour atténuer leurs effets.

2. Intérêt d'un refuge latéral pour les poissons

Les préoccupations concernant la gestion des éclusées ne sont pas récentes. En 1939, Vibert affirmait que le maintien de débits minimaux en aval des barrages ne constituait pas une mesure suffisante pour protéger les poissons. Plus récemment, Heller (2007) a proposé une gestion des débits d'éclusées par épanchement dans un aménagement hydraulique à buts multiples, attendant au cours d'eau principal. Dans ce contexte, Pellaud (2007) a montré que la meilleure réponse écologique d'un tel aménagement résulte de la combinaison d'un marnage mitigé et d'une morphologie diversifiée des berges du cours d'eau. En réponse à ce dernier point, le refuge à poissons proposé ici contribue à l'amélioration des habitats latéraux. Il fait suite aux travaux de Meile (2007) qui a étudié l'influence de macro-rugosités de berges sur l'atténuation des éclusées.

Durant les éclusées, les vitesses d'écoulement élevées affaiblissent les poissons et provoquent leur dépérissement ainsi que celui des invertébrés (Jungwirth & al., 2003). Lors de l'arrêt des turbines, l'abaissement rapide du plan d'eau peut également entraîner l'échouage des poissons sur le substrat du lit majeur (Baumann & Klaus, 2003). Une dégradation générale des habitats naturels est aussi observée le long des rivières concernées (Valentin & al. 1996, Ovidio & al. 2006, Gouraud & al. 2008). Elle est principalement engendrée par la modification du régime de charriage (Baumann & Klaus 2003, Eberstaller & Pinka 2001). Face à ces impacts, le refuge latéral s'inscrit comme mesure de protection des poissons contre les vitesses d'écoulement excessives, dans les rivières soumises aux éclusées.

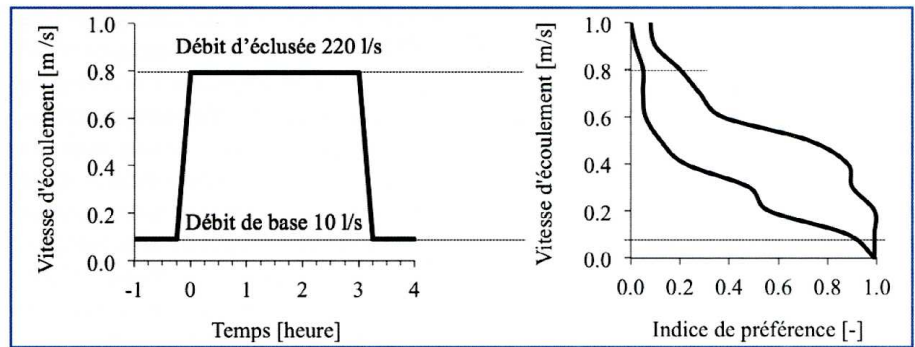


Figure 2. Paramètres hydrauliques du canal mis en relation avec les courbes de préférence de vitesse pour la truite fario au stade juvénile (tiré de Vismara & al. 2001).

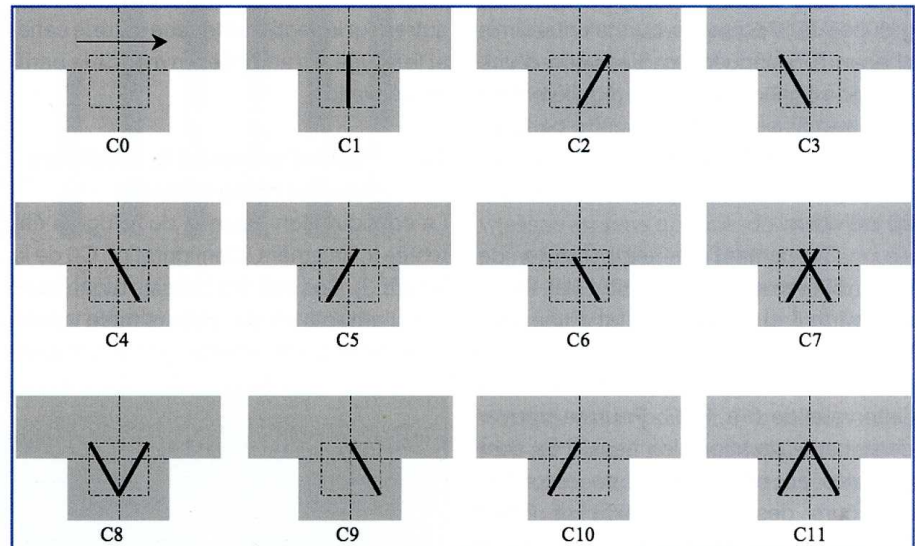


Figure 3. Configurations de refuge testées. Le trait gras représente la paroi de dérivation.

3. Etude expérimentale

Face à l'intérêt revêtu par l'installation de refuges latéraux, l'objectif de la présente recherche est d'en élaborer les formes et les conditions d'implantation, dans le but de maximiser leur taux d'occupation par les poissons lors des éclusées. Elle débouche sur des recommandations en vue de la réalisation de prototypes en rivière.

L'approche expérimentale consiste à mettre des poissons en situation d'éclusée dans un canal comprenant un refuge latéral. Dans ce but, un canal ad hoc a été construit dans l'ancienne usine hydroélectrique de la Maigrage, à Fribourg (Suisse). Ce site a été choisi car il bénéficie d'une alimentation en eau courante prélevée de la Sarine. D'une longueur utile de 12 m, le canal a une largeur de 1.2 m (Figure 1). Le refuge à parois vitrées, est aménagé en rive droite sur une largeur de 1.2 m et une longueur de 2 m. Le fond du canal, peint en blanc pour une meilleure visibilité des poissons, est constitué de galets colmatés au mortier. Le fond du refuge est recouvert de galets de rivière. L'éclusée est générée par l'ouverture de la vanne de régulation. Le débit est mesuré en continu, au même

titre que la température de l'eau. Les dimensions du canal sont adaptées à l'espèce de poissons retenue pour les essais. Il s'agit en l'occurrence de la truite fario (*Salmo trutta fario*) juvénile (0+ et 1+). Elle a été choisie pour sa représentativité de la population des rivières suisses concernées par les éclusées, et son stade de croissance pour sa vulnérabilité. De surcroît, elle a fait l'objet d'importantes recherches biologiques (Schager & Peter, 2001–2002), notamment en relation avec les éclusées (Murchie & al. 2008, Gouraud & al. 2008, Flodmark 2006, Valentin 1995, Scruton & al. 2003).

Les dimensions du canal sont fixées de manière à disposer de conditions de vitesses moyennes successivement favorables et défavorables, au sens des courbes de préférence d'habitat de l'espèce cible (Vismara & al. 2001, Figure 2 droite). Disposant d'un débit maximum de 220 l/s, la vitesse moyenne dans le canal passe de 0.1 m/s pour l'écoulement du débit de base de 10 l/s, à 0.8 m/s en situation d'éclusée (Figure 2 gauche), sous des hauteurs d'eau respectives de 0.10 et 0.24 m. D'autre part, la surface au sol du canal est fixée par la densité des

poissons. Souhaitant mettre en action 10 ou 20 poissons par essai, les densités retenues sont de 1 à 2 poissons/m² dans le canal et de 5 à 10 poissons/m² dans le refuge.

Les individus d'une longueur moyenne de 16.5 cm, ont été capturés à l'état sauvage, par pêche électrique au Tannenbach à Büttisholz (LU). Sur le site expérimental, ils séjournèrent dans un aquarium alimenté en eau de rivière et étaient nourris avec des macroinvertébrés vivants. Une marque distinctive permettait de partager l'effectif expérimental en 2 groupes de 10 poissons, qui étaient soumis chacun à 5 séquences d'éclusee d'une durée de 3 heures, réparties régulièrement sur 3 semaines. A la fin de cette période, ils étaient rapportés sur le site de capture et remplacés par un nouveau groupe de 20 individus.

Concernant la température de l'eau, différentes études (Küttel & al. 2002, Jungwirth & al. 2003) font état d'une vitalité du poisson optimale et peu influencée par les variations de ce paramètre, dans l'intervalle de 6 à 14°C. Pour se trouver dans cette situation, les essais se sont déroulés au printemps et en automne, au cours des années 2008 et 2009. Préalablement à chaque essai le débit de 10 l/s était établi et les poissons introduits à l'entrée du canal, dans un compartiment provisoirement cloisonné. Après une phase d'acclimatation, les poissons étaient libérés et le débit augmenté en quelques minutes à 220 l/s, puis maintenu pendant 3 heures. Durant cette période d'essai, la position des poissons était relevée visuellement à intervalles de 20 minutes, et leurs déplacements étaient enregistrés par une caméra vidéo installée à l'aplomb de la zone du refuge. Afin de valider les résultats, chaque configuration du refuge a été testée 3 fois. Le 1^{er} et le 2^{ème} essai étaient réalisés avec deux groupes distincts de 10 poissons et le 3^{ème} avec les 20 poissons. Chaque individu bénéficiait d'un temps de repos d'au moins 24 heures entre 2 essais.

Afin de pouvoir générer de nouvelles configurations de refuge à partir des observations antérieures, une connaissance des champs de vitesses dans le secteur concerné était nécessaire. Ils ont été produits par simulation numérique 2D avec le logiciel BASEMENT «BASic Environment for simulation of natural flow and hazard simulation» (Faeh & al. 2010), qui résout les équations des écoulements non-permanents à surface libre, par la méthode des volumes finis. La constitution

du maillage, le pré- et post-traitement des données ainsi que la visualisation des résultats ont été effectués avec le logiciel SMS «Surface Water Modelling System».

A la suite des essais avec les poissons, chaque configuration a également fait l'objet d'une série de mesures de profils verticaux de vitesses d'écoulement avec la technique UVP (Ultrasonic Velocity Profiler). Six sondes alignées en parallèle sur un support, étaient disposées successivement au droit de 4 sections caractéristiques: 2 sections transversales dans le canal, en amont et en aval du refuge, et 2 autres sur la section interface entre le canal et le refuge, en amont et en aval de la paroi de dérivation.

4. Optimisation de la configuration du refuge latéral

La configuration basique du refuge a été testée initialement (Configuration C0 de la Figure 3). Ces premiers essais montraient que l'attractivité de cette simple cavité aménagée dans la berge, est très limitée

pour le poisson. Les comptages donnent une fréquentation moyenne du refuge de 33%, caractérisée par une forte variabilité au cours des 3 heures d'essai. Ce désintérêt relatif peut s'expliquer par le faible échange d'eau entre le canal et le refuge.

Afin de créer un flux attractif dans le refuge, une paroi plane et verticale a été placée perpendiculairement à l'écoulement principal, au milieu de la ligne interface (Configuration C1 de la Figure 3), sur toute la hauteur d'eau. L'extrémité extérieure de cette paroi pénètre de 30 cm dans la section du canal et son extrémité intérieure laisse un espace de 50 cm jusqu'à la paroi du refuge. Durant les 3 essais d'une durée de 3 heures chacun, 74% des poissons en jeu étaient en moyenne présents dans le refuge (Figure 7). Cette performance résulte de la circulation d'un débit de 43 l/s dans le refuge, forcée par la présence de la paroi de dérivation. Ce débit représente 19% du débit total de 220 l/s (Figure 6). Sur la base de ce résultat, une maximisation de la présence moyenne a été recherchée par

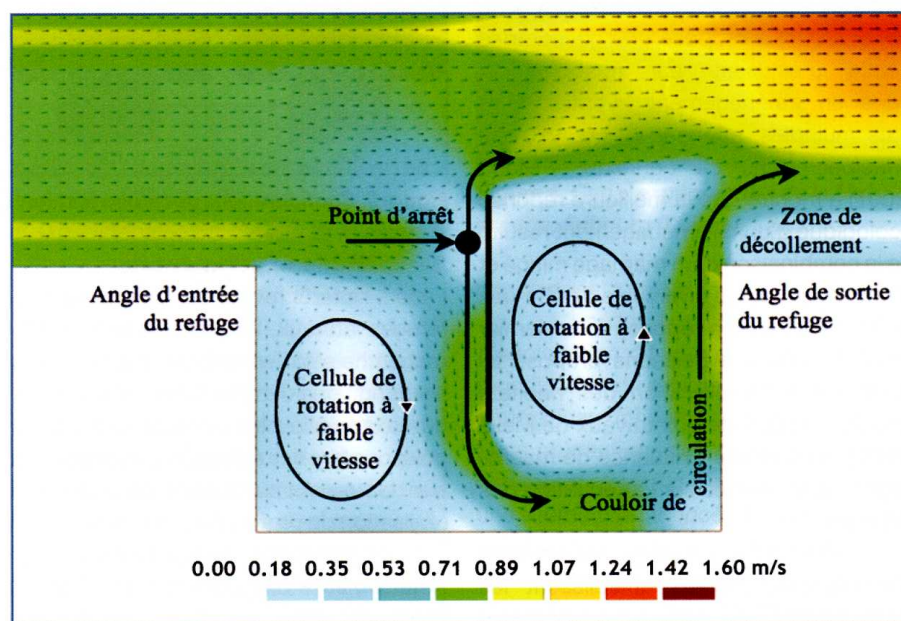


Figure 4. Champ de vitesses simulé par BASEMENT 2D, pour la configuration C1. Éléments significatifs de l'écoulement au voisinage et à l'intérieur du refuge.

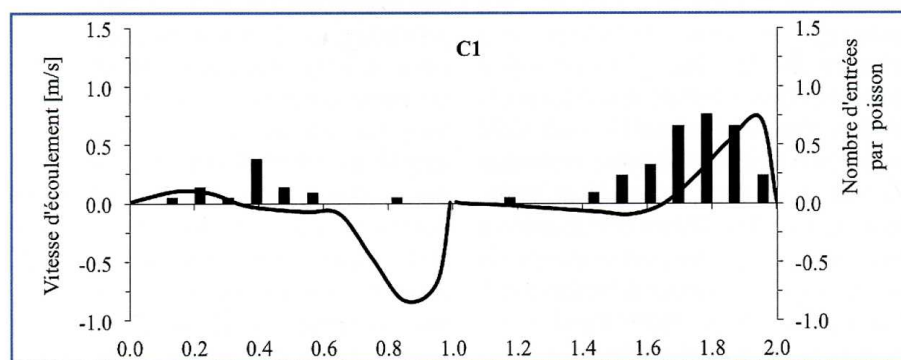


Figure 5. Distribution des vitesses d'écoulement le long de la ligne interface (ligne continue), à 0.025 m du fond, superposée à la distribution du nombre d'entrées des poissons (bâtonnets verticaux), pour la configuration C1.

la production systématique d'un ensemble de configurations (Figure 3). Celles-ci se distinguent par la position et l'orientation de la paroi de dérivation autour de 3 points fixes, dont 2 correspondent aux extrémités de la paroi de la configuration C1 et le 3^{ème} au centre de la ligne interface.

La procédure méthodologique décrite précédemment a ainsi été appliquée aux 12 configurations retenues. Chacune est documentée par un champ de vitesses simulé avec BASEMENT 2D, un ensemble de 27 fiches de relevés de la position des poissons, 9 heures

d'enregistrement vidéo, et 24 profils de vitesses mesurés par UVP dans 4 sections. Ces informations permettent de définir le débit dérivé dans le refuge (Figure 6), le taux de présence moyen de poissons dans le refuge (Figure 7), le nombre de passages de poissons entrant dans le refuge à travers la ligne interface décomposée en intervalles de 10 cm, ainsi que les vitesses d'écoulement rencontrées au milieu des mêmes intervalles. Les structures d'écoulement significatives de la configuration C1 sont mises en évidence sur la Figure 4, en superposition du champ de vitesses simulées avec BASEMENT 2D. Concernant la distribution des vitesses le long de la ligne interface (Figure 5), elle montre 2 points, l'une pour le flux entrant dans le refuge et l'autre pour le flux sortant. Chacune est attenante à une zone de vitesses en sens opposé, délimitée par un point intermédiaire où la vitesse s'annule, le point de cisaillement. Quant aux entrées des poissons (Figure 5), elles ont lieu de manière préférentielle aux alentours du point de cisaillement, là où le gradient de vitesses est important. Par ailleurs elles sont nettement plus nombreuses dans la partie de la section interface située en aval de la paroi de dérivation.

L'ensemble de ces constatations est généralisable à toutes les configurations qui comprennent une paroi de dérivation. A cet égard, il est clairement démontré que les vitesses recherchées par les poissons pour entrer dans le refuge sont majoritairement comprises entre 0 et 0.3 m/s. Il est dès lors possible de conclure à l'importance de la structure des écoulements dans le refuge. D'une part, le courant dérivé est indispensable pour attirer le poisson vers le refuge, d'autre part, les cellules de rotation sont essentielles pour faciliter leur entrée.

Les résultats présentés sur la Figure 7, montrent que les configurations C8 et C3 ont les meilleurs taux de présence, soit 87 et 82% respectivement. Ces 2 configurations ont en commun la position et l'orientation de la face amont de la paroi de dérivation, qui peuvent être considérées comme les plus favorables. Avec son taux de présence maximum, la configuration C8 est proposée comme référence pour la réalisation de prototypes en rivière (Figure 8).

5. Recommandations

Pour la transposition en rivière du refuge expérimental, la question des dimensions adéquates se pose en premier ordre. Le problème réside dans la définition de

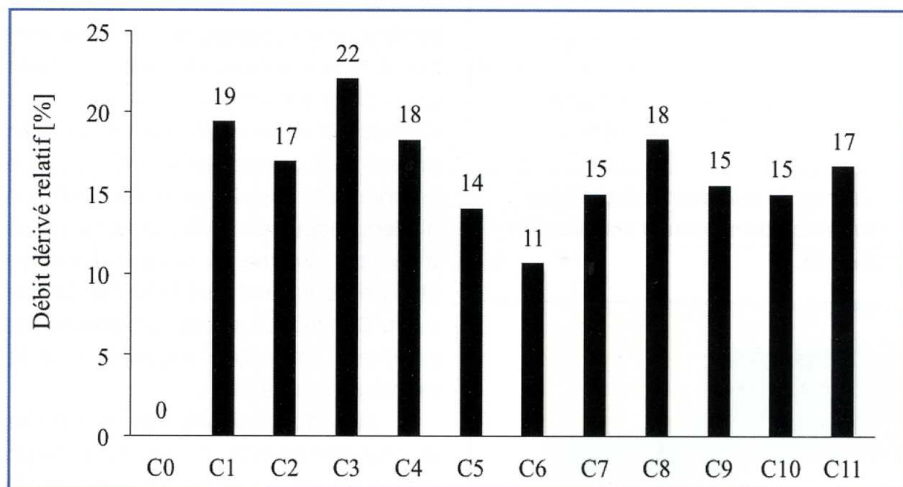


Figure 6. Débits dérivés dans le refuge rapportés au débit total transitant dans le canal expérimental, pour chaque configuration.

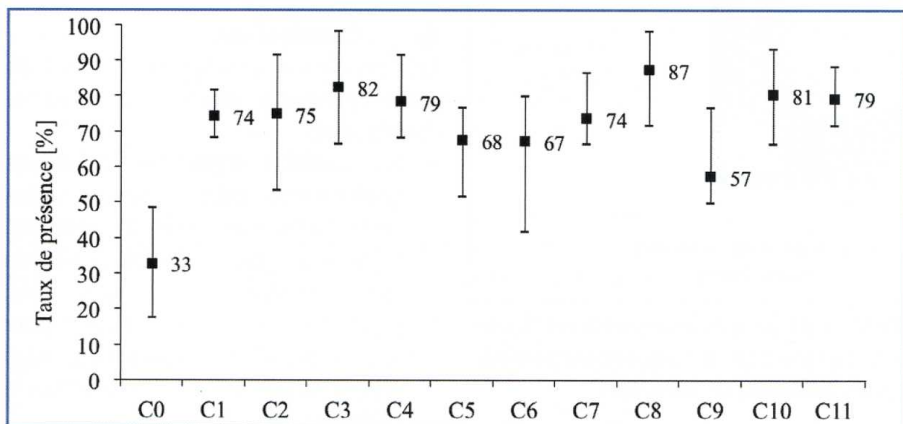


Figure 7. Taux de présence des poissons dans le refuge, moyennés sur les 3 essais relatifs à chaque configuration, valeurs maximales, moyennes et minimales, avec mention chiffrée des valeurs moyennes.

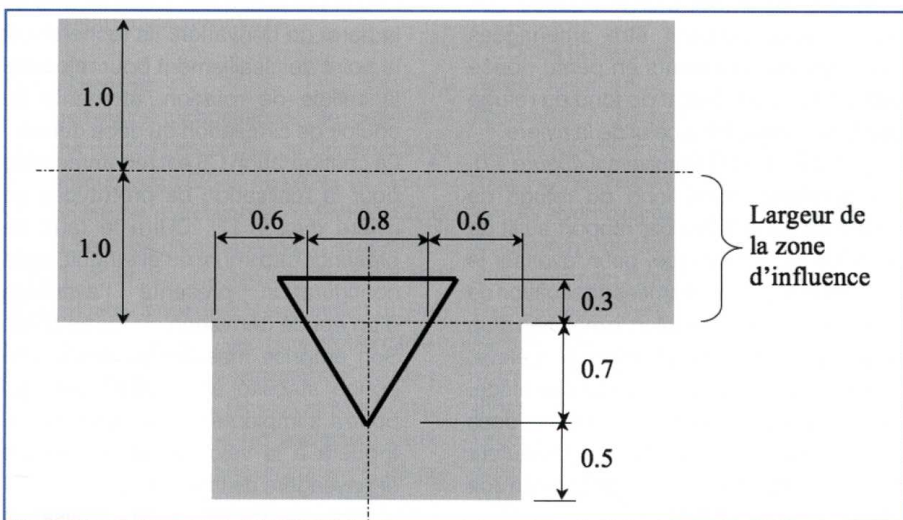


Figure 8. Dimensions proportionnelles du refuge pour la configuration C8. L'unité est donnée par la largeur de la zone d'influence du refuge, inférieure ou égale à la demi-largeur du cours d'eau.

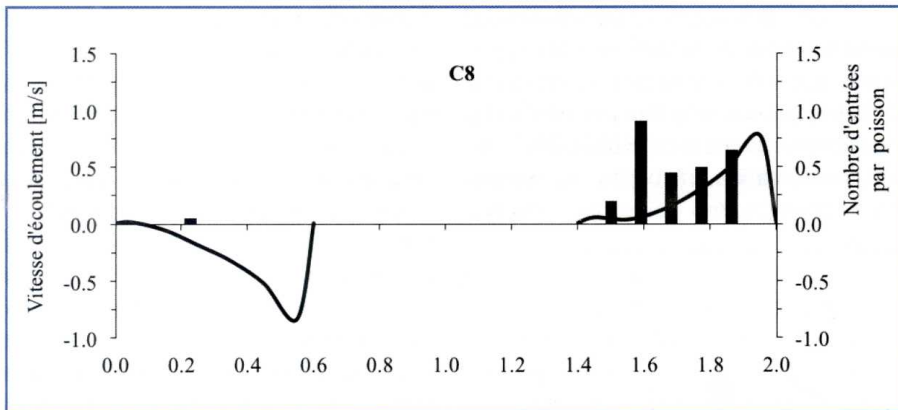


Figure 9. Distribution des vitesses d'écoulement le long de la ligne interface (ligne continue), à 0.025 m du fond, superposée à la distribution du nombre d'entrées par poisson (bâtonnets verticaux), dans la configuration C8.

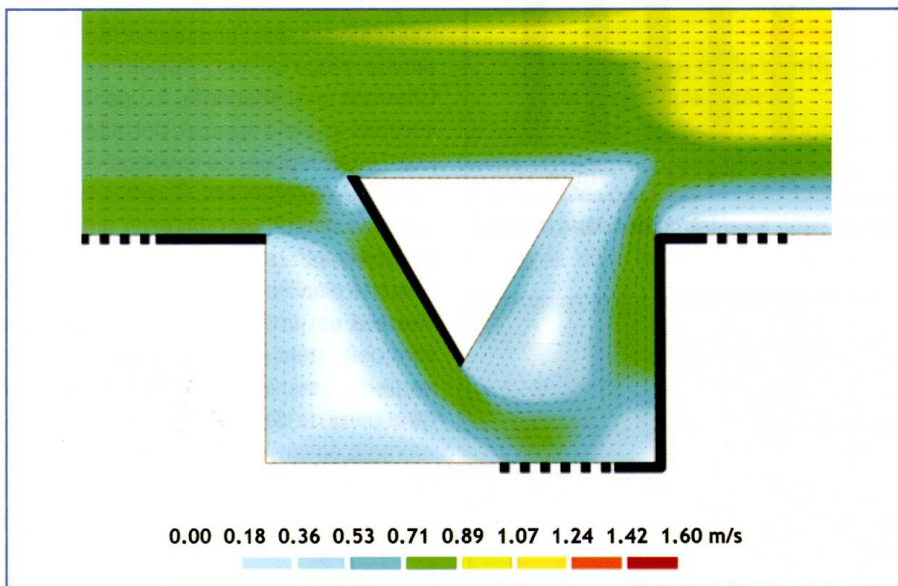


Figure 10. Champ de vitesses simulé par BASEMENT 2D, pour la configuration C8, proposée pour la réalisation de prototypes en rivière. Les traits gras indiquent les parois à bien marquer dans le projet, les pointillés indiquent les zones de transition.

l'emprise nécessaire de la zone d'influence du refuge sur la largeur de la rivière, pour attirer le poisson. Différents scénarios examinés (Ribi, 2011) conduisent à proposer la règle suivante:

Au delà d'une valeur minimale de 10 m qui s'impose pour se prémunir contre les obstructions, la longueur de la ligne interface devrait être comprise entre la moitié de la largeur du lit, pour des cours d'eau importants et sa totalité pour de petites rivières. Toutes les autres dimensions du refuge sont à reporter proportionnellement, en référence à celles de la Figure 8.

D'un point de vue constructif, il est essentiel de reproduire fidèlement la structure des écoulements dans le refuge, en particulier le profil de vitesses dans la section interface (Figure 9). Pour y parvenir il est nécessaire d'implanter en conformité les parois qui guident le débit dérivé dans le refuge (Figure 10). Leur

parement devrait être constitué de blocs d'enrochement empilés en pente raide sur plus de la moitié de la hauteur de marnage, avec des extrémités bien marquées. Les autres faces peuvent être aménagées avec des enrochements en pente douce (Figure 11). Le substrat du fond du refuge doit être semblable à celui de la rivière.

Sur le profil transversal (Figure 11), une surélévation du fond du refuge de l'ordre de 0.5 à 1.0 m par rapport au lit de la rivière est préconisée, pour favoriser le transit des alluvions charriées en situation de crue. Cette mesure requiert le maintien d'un niveau d'eau minimum d'autant plus élevé, afin de préserver les habitats dans le refuge. Si le niveau d'eau minimum souhaité dans le refuge est de l'ordre de 0.5 m, la hauteur d'eau minimale dans la rivière adjacente doit être supérieure à 1.0 m.

Concernant l'équidistance entre les refuges, 2 critères peuvent être avancés. Le premier concerne la densité

de poissons. Si celle du refuge peut être estimée à 10 à 20 individus/m², celle du lit est variable dans une proportion supérieure à 1/10 selon la taille de la rivière (Schager & Peter, 2007). Le second critère concerne la capacité du poisson à rejoindre un refuge en phase montante de l'écluse. La distance recherchée est alors celle que les poissons peuvent parcourir en vitesse de croisière avant qu'ils ne soient emportés par le courant. A cet égard, un accroissement de débit en paliers peut augmenter leur distance de parcours. Dans les 2 cas, la détermination de l'équidistance est dépendante du cas d'espèce, soit de la rivière concernée et du déroulement des éclusées qu'elle subit. Des investigations expérimentales en rivière sont donc requises pour se prononcer sur ce point.

Quant à la distribution des refuges le long des berges, elle est en principe prévue en alternance de part et d'autre du cours d'eau. En réalité il faudra éviter des zones d'atterrissements potentiels.

6. Conclusions

Les principaux enseignements tirés de cette recherche peuvent se résumer comme suit:

- En situation d'éclusées, le refuge latéral simple est une mesure faiblement attractive pour le poisson. L'installation dans le refuge d'un épi de dérivation d'une partie du courant, produit un attrait remarquable pour le poisson. L'orientation et la position de cet épi permettent de maximiser la performance.
- La restitution au canal du débit dérivé produit le courant d'attrait. Les poissons entrent principalement dans le refuge par la section située en aval de la paroi de dérivation. Ils recherchent le point de cisaillement pour rejoindre la cellule de rotation, attenante au couloir de circulation du débit dérivé.
- La configuration C8 est recommandée pour la réalisation de prototypes en rivière (Figure 11). Outre le taux de présence maximum qu'elle induit, cette configuration présente l'avantage d'un épi de dérivation en forme d'îlot. Son emprise massive lui donne une bonne stabilité et la végétation qui pourra s'implanter à sa surface contribuera à la valorisation écologique et paysagère de l'ouvrage.

Préalablement à la réalisation généralisée de refuges, une validation en rivière doit être opérée. De cette façon, l'adaptation du dispositif sera testée avec

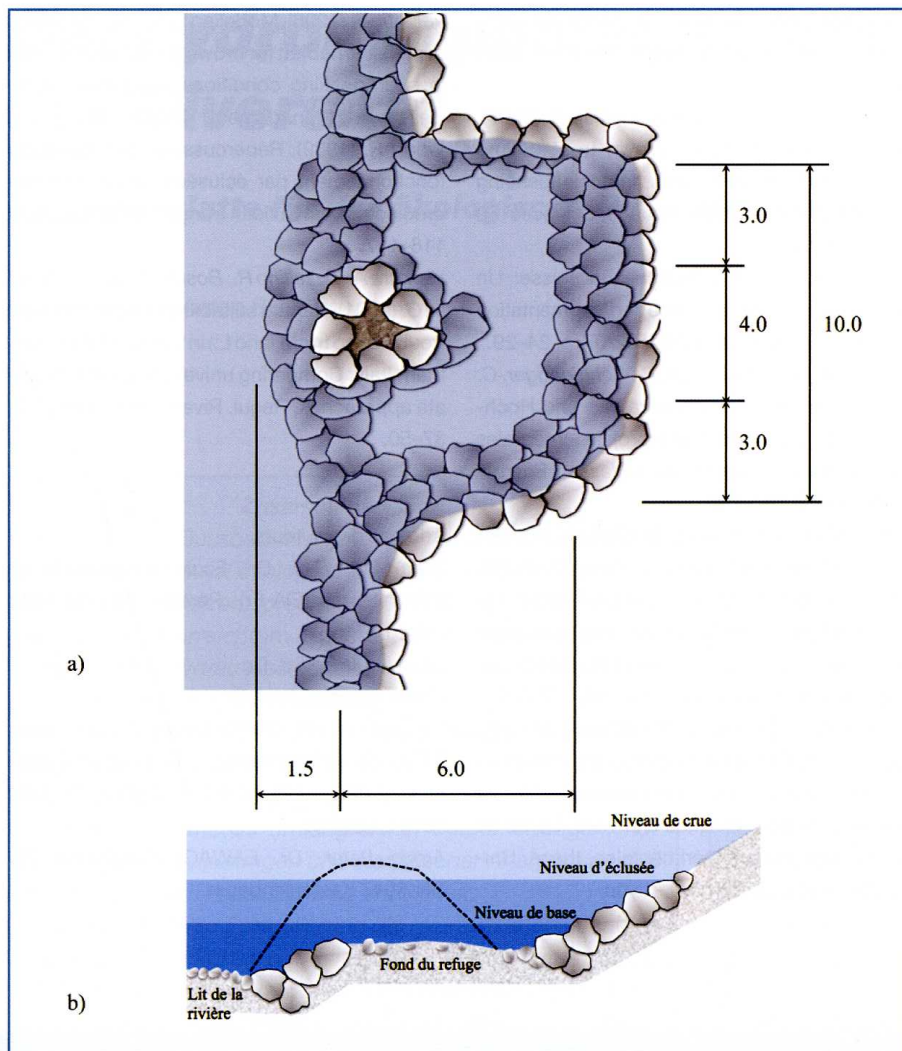


Figure 11. Esquisse pour un prototype de refuge avec des dimensions minimales indicatives [m] : a) Vue en plan, b) Coupe transversale en amont de l'îlot de dérivation.

d'autres espèces à d'autres stades de croissance, sous toutes conditions de température. Selon cette démarche, les présentes recommandations seront utiles à la réalisation de prototypes de refuges, qui feront l'objet d'un suivi scientifique. A l'issue de ce processus le produit sera véritablement opérationnel.

Remerciements

Les partenaires académiques de cette recherche sont le Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'EPFL, l'EAWAG et l'Ecole d'Ingénieurs et d'Architectes de Fribourg. Elle est au bénéfice d'un subside CTI sous-projet 9676.1 PFIW-IW «Nachhaltige Nutzung der Wasserkraft – Innovative Massnahmen zur Reduzierung der Schwall- und Sunkproblematik». Les partenaires de l'économie sont le Groupe-E SA, l'Etat de Fribourg, Ribí SA et KWO-Grimselstrom. La recherche fait également partie du projet interdisciplinaire «Intégrales Flussgebietsmanagement» (Schleiss & al. 2008) soutenu par l'OFEV. Le canal expérimental a été financé par l'EIA-Fr et a pu être installé à l'usine de la Maigrave grâce à la bienveillance du

Groupe-E SA. Les simulations numériques ont été effectuées avec la collaboration de Kathrina Steffen dans le cadre de son projet de master à l'EPFL.

Références

- Baumann P., Klaus I. (2003). Conséquences écologiques des éclusées, Etude bibliographique, Informations concernant la pêche n° 75, Office Fédérale de l'Environnement, OFEV, Berne, Suisse.
- Eberstaller J., Pinka P. (2001). Trübung und Schwall Alpenrhein-Einfluss auf Substrat, Benthos, Fische, Teilbericht Fischökologie, Abteilung für Hydrobiologie, Fischereiwirtschaft und Aquakultur, Internationale Regierungskommission Alpenrhein Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie, Wien.
- Faeh R., Mueller R., Rousselot P., Vetsch D., Volz C., Vonwiller L., Veprek R., Farshi D. (2010). System Manuals of BASEMENT, Version 2.1. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology – VAW. Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- Fischnetz (2004). Sur la trace du déclin piscicole. Rapport final. EAWAG/OFEV.
- Flodmark L. E. W., Forseth T., L'Abbe'e-Lund J.

H., Vøllestad L. A. (2006). Behaviour and growth of juvenile brown trout exposed to fluctuating flow, *Ecology of Freshwater Fish* 2006: 15: 57–65.

Gouraud V., Capra H., Sabaton C., Tissot L., Lim P., Vandewalle F., Fahrner G., Souchon Y. (2008). Long-term simulations of the dynamics of trout populations on river reaches bypassed by hydroelectric installations – Analysis of the impact of different hydrological scenarios, *River. Res. Applic.* 24: 1185–1205.

Heller P. (2007). Méthodologie pour la conception et la gestion des aménagements hydrauliques à buts multiples par une analyse systémique. Thèse 3781 Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Communication n° 41 LCH-EPFL.

Jungwirth M., Haidvogel G., Moog O., Muhar S., Schmutz S. (2003). *Angewandte Fischökologie an Fliessgewässern*, UTB Verlag Wien.

Küttel S., Peter A., Wüest A. (2002). Rhône Revitalisierung, Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten Schweizerischer Fliessgewässer, Publikation Nr. 1.

Meile T., Fette M., Baumann P. (2005). *Synthese Schwall/Sunk*. Publikation des Rhone-Thur Projektes. Eawag, WSL, LCH-EPFL, Limnex. 48 pp.

Meile T. (2007). Influence of macro-roughness of walls on steady and unsteady flow in a channel. Thèse 3952, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Meile T., Boillat J.-L., Schleiss A.J. (2011). Hydropeaking indicators for characterization of Upper-Rhone River in Switzerland. *Aqua Sci.* 2011, 73: 171–182.

Murchie K.J., Hair K.P.E., Pullen C.E., Redpath T.D., Stephens H.R. Cooke S.J. (2008). Fish response to modified flow regimes in regulated rivers, *Research methods, effects and opportunities*, *River Research and Applications* 24: 197–217.

Ovidio M., Capra H., Philippart J.-C. (2008). Regulated discharge produces substantial demographic changes on four typical fish species of a small salmonid stream. *Hydrobiologia* 609: 59–70.

Pellaud M. (2007). Ecological response of a multi-purpose river development project using macro-invertebrates richness and fish habitat value. Thèse 3807 Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Peter A., Schager E. (2004). Le déclin piscicole est dû à une qualité morphologique insuffisante des cours d'eau. Rapport final du projet Réseau suisse poissons en diminution. EAWAG/OFEV, 2004.

Ribi J.-M., Steffen K., Boillat J.-L., Peter A., Schleiss A.J. (2009). Influence of geometry of fish shelters in river banks on their attractiveness for fishes during hydropeaking. *Proceedings of the 33rd Congress of IAHR*, Vancouver, Ca-

nada, August 9–14, ISBN: 978-94-90365-01-1. pp. 6074–6081.

Ribi J.-M., Boillat J.-L., Schleiss A. J. (2010). Flow exchange between a channel and a rectangular embayment equipped with a diverting structure. Proceedings of the 5th International Conference on Fluvial Hydraulics River Flow 2010, September 8–10, Braunschweig, Germany, Eds.: Dittrich, Koll, Aeberle & Geisenhainer, Bundesanstalt für Wasserbau, ISBN 978-3-939230-00-7, p. 665–671.

Ribi J.-M., Boillat J.-L., Peter A., Schleiss A. J. (2010). Fish behavior during hydropeaking in a channel equipped with a lateral shelter. Proceedings of the 8th International Symposium on Ecohydraulics (ISE 2010), COEX, Seoul, Korea, September 12–16, 2010, p. 675–682.

Ribi J.-M. (2011). Etude expérimentale de refuges à poissons aménagés dans les berges de rivières soumises aux éclusées hydroélectriques. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse). Thèse n° 5173 et Communication n° 50 du Laboratoire de Constructions Hydrauliques, LCH-EPFL, ed. A. Schleiss, Lausanne.

Schager E., Peter A. (2001). Bachforellensömerlinge Phase 1, Netzwerk Fischrückgang Schweiz, EAWAG.

Schager E., Peter A. (2002). Bachforellensömerlinge Phase 2, Netzwerk Fischrückgang Schweiz, EAWAG.

Schager E., Peter A., Burhardt-Holm P. (2007). Status of young-of-year brown trout (*Salmo trutta fario*) in Swiss streams: factor influencing YOY trout recruitment, Aquatic Sciences 69 (2007) 41–50.

Schleiss A. (2007). L'hydraulique suisse: Un grand potentiel de croissance par l'augmentation de la puissance. Bulletin SEV 02/07, p. 24–29.

Schleiss A., Peter A., Faeh, R., Scheidegger, C. (2008). Dynamische Lebensräume und Hochwasserschutz – Forschungsprojekt «Integrales Flussgebietsmanagement». «Wasser Energie Luft» 100 (3): 187–194.

Scruton D. A., Ollerhead, L. M. Clarke K. D., Pen- nel C., Alfredsen K., Harby A., Kelley D. (2003). The behaviour response of juvenile Atlantic Salmon and brown trout to experimental hydropeaking power generation on a Newfoundland river. River Research and Application, 19, 577–587.

Valentin S. (1995). Variabilité artificielle des conditions d'habitat et conséquences sur les peuplements aquatiques: effets écologiques des éclusées hydroélectriques en rivière, Etude de cas et approches expérimentales, thèse, Université de Claude Bernard – Lyon.

Valentin S. (1996). Modeling temporal variations of physical habitat for brown trout (*Salmo trutta*) in hydropeaking conditions, regulated rivers. Research & Management, 12, 317–330.

Vibert R. (1939). Répercussions piscicoles du fonctionnement par éclusées des usines hydroélectriques. Bulletin français de pisciculture 116–117.

Vismara A., Azzellino R., Bosi R., Crosa G., Gentili G. (2001). Habitat suitability curves for brown trout (*Salmo trutta fario* L.) in the river Adda, northern Italy: Comparing univariate and multivariate approaches, Regul. Rivers: Res. Mgmt. 17: 37–50.

Adresse des auteurs

Jean-Marc Ribi, Dr. Ecole d'Ingénieurs et d'Architectes (EIA-Fr), Péroilles 80, CH-1700 Fribourg.

Jean-Louis Boillat, Dr.

Anton Schleiss, Prof. Dr.

Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), LCH-IIC-EPFL, Station 18, CH-1015 Lausanne.

Armin Peter, Dr. EAWAG, Seestrasse 79, CH-6047 Kastanienbaum.